

Suivi et identification de trajectoires sur un réseau de capteurs binaires

Y. Busnel¹, L. Querzoni², R. Baldoni², M. Bertier³ et A.-M. Kermarrec⁴

¹ IRISA / Université de Rennes 1

² MIDLAB / Université de Rome – “La Sapienza”

³ IRISA / INSA Rennes

⁴ INRIA Rennes – Bretagne Atlantique

Étant donné un ensemble de capteurs binaires permettant de suivre les trajectoires d'objets mobiles anonymes, cet article étudie le problème de l'association déterministe d'un chemin révélé par le réseau de capteurs avec la trajectoire réelle d'un unique objet, nommé le problème de *suivi d'objets multiples et leur identification* (SOMI). La difficulté de SOMI réside dans le fait que les trajectoires de deux objets – ou plus – peuvent être si proches qu'elles deviennent indiscernables, rendant impossible l'association déterministe des chemins observés avec la trajectoire d'un objet. Dans cet article, le système est représenté par un graphe connexe épars représentant la position des capteurs et la possibilité pour un objet quelconque de se déplacer directement de la zone de couverture d'un capteur à celle d'un autre. Nous montrons d'abord que SOMI ne peut être résolu sur un graphe quelconque, même par la présence d'un observateur omniscient externe, si les objets sont libres de leur déplacement. Puis, nous décrivons quelques restrictions pouvant être imposées *a priori* au graphe, aux objets mobiles ou aux deux, permettant de rendre SOMI résoluble.

Keywords: Réseaux de capteurs binaires, Suivi de trajectoires, Modélisation, Conditions de solvabilité

1 Introduction

Contexte Suivre les mouvements d'objets anonymes et indiscernables, et associer à chaque trajectoire d'un objet un identifiant unique, est un problème difficile de base dans de nombreux contextes applicatifs tels que la surveillance [OS05], le sauvetage, l'étude de trafic [BIL⁺07], *etc.* De plus, en utilisant la technologie naissante des capteurs, la faillibilité potentielle de ceux-ci (*e.g.* [ABC⁺03]) et la complexité du calcul d'un système de localisation (*e.g.* [AGY04]) compliquent de façon non négligeable l'initiation, la maintenance et la terminaison du suivi de trajectoires d'objets.

De ceci résulte par exemple de fausses détections et des observations manquantes. Même si nous considérons des capteurs idéaux permettant d'éliminer ces effets, le problème d'associer un identifiant unique à une trajectoire devant refléter exactement celle d'un unique objet est difficile due à la fusion potentielle des chemins. Il est alors possible de confondre les trajectoires dans le cas où les capteurs ne posséderaient pas les capacités adéquates (telles que la puissance de calcul, les ressources réseaux, la sensibilité de capture, *etc.* [LLR⁺03]). En d'autres termes, deux trajectoires peuvent devenir si proches l'une de l'autre qu'elles deviennent indiscernables, et donc impossible à identifier après leur séparation. Après la fusion de trajectoire, se pose la question de l'association de trajectoires plus pertinente qu'une autre selon des hypothèses multiples. Cette décision est souvent prise de façon probabiliste en étudiant le comportement des objets avant la fusion [LLR⁺03]. Dans la suite, cette association bijective entre les trajectoires observées et celles des objets sera identifiée comme le problème de *suivi d'objets multiples et leur identification* (SOMI).

Nous explorons SOMI par l'utilisation d'un réseau de capteurs binaires, ce qui signifie que chaque capteur retourne uniquement une valeur binaire indiquant si un objet est situé dans sa zone de réception ou non. L'intérêt de cibler l'étude sur de telles entités, simples et minimalistes, est motivé par le fait que nous désirons étudier l'essence de la solvabilité de SOMI, sans prendre en compte les caractéristiques de puissance des capteurs. Comme dans [OS05], dans notre modèle, le réseau de capteurs est représenté par un graphe connexe épars, dénommé *graphe de connectivité des chemins* (GCC), dans lequel chaque sommet représente un capteur binaire et il existe un arc entre deux capteurs u et v seulement si un objet peut passer de la zone de réception de u à celle de v sans activer d'autres capteurs.

Contribution Dans cet article, nous montrons qu'il est impossible de résoudre le problème SOMI dans un graphe quelconque, et ceci, même avec l'aide d'un observateur omniscient possédant la connaissance complète de l'état du système. De plus, nous considérons des conditions idéales pour la détection de trajectoires telles que des capteurs binaires parfaits (*i.e.* pas de fausses détections ou d'observations manquantes), couverture idéale des zones de captures (*i.e.* zones de captures disjointes). À chaque instant donné, un objet ne peut activer qu'un seul capteur et un capteur n'est activé au plus que par un objet. Nous montrons que l'impossibilité de SOMI provient d'un problème structurel dépendant fortement de la topologie du GCC. Ensuite, nous présentons quelques restrictions qu'il est possible d'imposer *a priori* à la fois sur le graphe, sur les mouvements des objets ou sur les deux, afin de rendre SOMI toujours résoluble, comme dans le cas d'un GCC acyclique par exemple. Plus spécifiquement, si le GCC contient des cycles d'une longueur supérieure ou égale à ℓ , il est toujours possible de résoudre SOMI si le nombre maximum d'objets en mouvements simultanés est strictement plus petit que $\lceil \frac{\ell}{2} \rceil$.

2 Caractéristiques du système

Nous considérons un système composé d'un ensemble d'objets génériques, se déplaçant dans un environnement où des capteurs peuvent détecter leur présence. Un tel environnement peut être modélisé par un graphe de connectivité des chemins (GCC) $G(V, E)$ dans lequel l'ensemble des sommets V représente des capteurs binaires, et pour chaque $e_{i,j} \in E$ reliant deux sommets $v_i, v_j \in V$, il est possible pour un objet de se déplacer d'une position détectée par v_i à une autre détectée par v_j sans activer aucun autre capteur binaire. Dans cet environnement, les mouvements sont toujours possibles dans les deux directions, le GCC est donc non-orienté. De plus, nous considérons qu'il existe au plus un chemin direct pour se déplacer d'une position vers une autre adjacente sans activer d'autre capteurs : au plus un arc peut relier deux sommets du GCC. Pour chacun des sommets v_i , il existe dans E un arc propre $e_{i,i}$ représentant la possibilité pour un objet de rester à la même position.

L'ensemble des objets $\{o_1, \dots, o_x\}$ est dénoté \mathbb{O} . Le temps est représenté comme une suite discrète et infinie $T = \llbracket t_0, t_1, \dots \rrbracket$. À chaque instant t , chaque objet o occupe une position représentée par un sommet $v_i \in V$, donnée par la fonction $loc : T \times \mathbb{O} \rightarrow V$. Les seuls déplacements autorisés pour les objets sont les arcs de E (un objet situé en v_i ne peut passer en v_j que s'il existe un arc $e_{i,j} \in E$).

Nous considérons les deux hypothèses suivantes : (i) deux objets distincts ne peuvent se trouver à la même position en même temps (*i.e.* $loc_t(o_i) \neq loc_t(o_j)$) et (ii) deux objets distincts ne peuvent se déplacer sur le même arc en même temps. Chaque objet $o \in \mathbb{O}$ se déplace dans le système en suivant une trajectoire. Cette trajectoire décrite entre les temps $t_i, t_j \in T$ (pour $j > i$) est définie par $P_{t_i, t_j, o} = \langle v^{t_i}, \dots, v^{t_j} \rangle$ où $v^k = loc_{t_k}(o), k \in \llbracket i, j \rrbracket$. Pour t_i et t_j donnée, la trajectoire globale est définie comme l'ensemble des trajectoires de tous les objets de \mathbb{O} : $P_{t_i, t_j} = \{P_{t_i, t_j, o}\}_{o \in \mathbb{O}} \in \mathbb{P}_{t_i, t_j}$ (\mathbb{P}_{t_i, t_j} représente l'ensemble de toutes les trajectoires possibles dans le GCC considéré pour x objets durant la période $\llbracket t_i, t_j \rrbracket$).

État du système L'état du système au temps t , noté S_t , est décrit comme l'état de chaque capteur (présence ou non d'un objet) et représenté par un vecteur de valeurs booléennes, une pour chaque sommet du GCC :

$$\forall v \in V, S_t[v] = \begin{cases} 1 & \text{si } \exists o \in \mathbb{O} : loc_t(o) = v \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

L'observateur Le système possède un observateur capable de lire, à tout temps t , le vecteur d'état S_t . Le but de cet observateur est d'identifier les objets et de suivre leur trajectoire à travers le temps. Étant donné le vecteur d'état S_t , l'observateur utilise une fonction tag qui lui permet d'associer à chaque sommet occupé v un identifiant unique $\bar{o} \in \bar{\mathbb{O}}$. La seule contrainte est que deux sommets ne peuvent partager le même identifiant. Chaque identifiant représente un objet, identifié comme unique par l'observateur. Le vecteur contenant la liste des sommets pour un identifiant unique donné représente donc une trajectoire observée : $\bar{P}_{t_i, t_j, \bar{o}} = \langle v^{t_i}, \dots, v^{t_j} \rangle$. De la même façon, nous pouvons définir la *trajectoire globale observée* par $\bar{P}_{t_i, t_j} = \{\bar{P}_{t_i, t_j, \bar{o}}\}_{\bar{o} \in \bar{\mathbb{O}}}$. Trivialement, le domaine des trajectoires réelles et observées est unique : \bar{P}_{t_i, t_j} appartient à \mathbb{P}_{t_i, t_j} .

3 Identification d'objets et suivi de leur trajectoire

Le Problème SOMI Considérons un intervalle de temps $\llbracket t_i, t_j \rrbracket$. Le problème SOMI correspond à la définition d'une fonction tag respectant la condition suivante : $\forall o \in \mathbb{O}, \exists \bar{o} \in \bar{\mathbb{O}} : P_{t_i, t_j, o} = \bar{P}_{t_i, t_j, \bar{o}}$. D'un point de vue global,

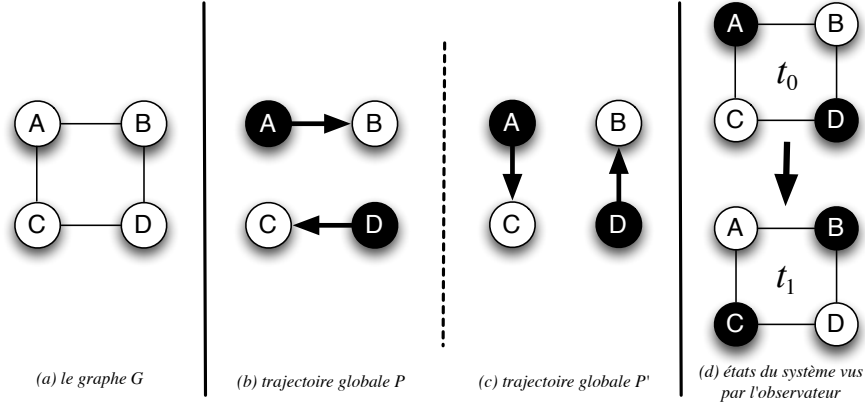


FIG. 1: Un exemple simple pour lequel l'observateur ne peut pas suivre précisément la trajectoire des objets.

Pour le GCC G présenté en (a) hébergeant deux objets, les deux trajectoires globales P et P' , présentées en (b) et (c) respectivement, sont possibles. L'observateur n'est donc pas capable de déterminer si les objets ont bougé selon la trajectoire P ou P' , en n'utilisant que les informations disponible en (d).

nous pouvons définir SOMI selon la condition suivante : $P_{i,t_j} = \bar{P}_{i,t_j}$. Ceci signifie que l'ensemble des trajectoires observées est identique à celui des trajectoires réelles. La difficulté de ce problème provient du fait qu'il existe des situations pour lesquelles l'observateur peut confondre au moins deux trajectoires, et pouvant alors rendre un résultat erroné.

Un résultat d'impossibilité En raison d'une contrainte d'espace, nous ne pouvons fournir dans cet article la preuve formelle d'impossibilité. Voici en résumé l'intuition de celle-ci ainsi que les deux théorèmes fondamentaux permettant de conclure à l'impossibilité générale de SOMI. Premièrement, nous pouvons formaliser une condition pour laquelle la solvabilité de SOMI est impossible :

Théorème 1 (Condition de non-solvabilité de SOMI) : Soient un intervalle de temps $\llbracket t_i, t_j \rrbracket$, un GCC $G(V, E)$, un ensemble \mathbb{O} de x objets et une fonction tag , SOMI n'est pas résoluble ssi, $\exists P, P' \in \mathbb{P}_{t_i, t_j} : P \neq P' \wedge \bar{P} = \bar{P}'$ où \bar{P} et \bar{P}' sont obtenus par l'observateur en utilisant la fonction tag à partir des trajectoires réelles P et P' .

En d'autres termes, ce théorème montre que s'il existe deux trajectoires globales distinctes possédant les mêmes vecteurs états durant une période de temps, alors l'observateur ne sera pas capable de distinguer quelles trajectoires ont effectivement été empruntées par les objets. Il n'est plus possible d'obtenir de façon déterministe l'association "trajectoire réelle égale à la trajectoire observée", et SOMI n'est pas résolu.

Nous allons maintenant montrer qu'il existe au moins un contre-exemple pour lequel la condition du théorème 1 est vérifiée. Si un tel contre-exemple existe, nous avons immédiatement le résultat d'impossibilité dans le cas d'un GCC quelconque. Considérons le GCC à 4 sommets présenté en figure 1.a. Pour chacune des trajectoires P et P' présentées respectivement en figures 1.b et 1.c, les vecteurs d'états sont strictement identiques (cf. figure 1.d). L'observateur ne peut donc pas déterminer quelle trajectoire a été effectivement suivie, uniquement par l'utilisation d'une fonction tag donnée, celle-ci ne prenant en paramètre que la séquence des vecteurs d'états (seule information disponible par l'observateur). Dans ce cas, la fonction tag rendra le même résultat observé pour les deux trajectoires différentes P et P' . La condition $P \neq P' \wedge \bar{P} = \bar{P}'$ est donc vérifiée. SOMI n'est donc pas résoluble dans un graphe quelconque. Ce résultat existe malgré les hypothèses très fortes introduites précédemment concernant le système, et reste alors valable pour un système répondant à des hypothèses plus faibles.

4 Solvabilité de SOMI

Identification des situations "dangereuses" Afin de contraindre le système de façon minimale, nous devons déterminer des caractérisations de solvabilité de SOMI. Pour cela, nous devons introduire deux nouvelles notions : mouvement et fiabilité. Un *mouvement* est l'ensemble des déplacements des objets de \mathbb{O} entre deux temps consécutifs : pour un $t \in T$ donné, $M_t = P_{t,t+1}$. Un mouvement est donc composé d'un ou plusieurs déplacements unitaires d'objets distincts (un objet ne peut se trouver au temps $t + 1$ au-delà d'un sommet adjacent à celui sur lequel il est situé au temps t). Il représente donc comment le système évolue immédiatement après le temps t . A

chaque temps, nous pouvons identifier tous les déplacements possibles d'un objet, et donc, déterminer tous les mouvements M possibles. Un mouvement (resp. un état) *fiable* est le dual de la définition 1 (resp. 2) suivante :

Définition 1 (Mouvement non-fiable) : *Considérons deux états S et S' tel qu'il existe un mouvement M permettant de passer directement de S à S' ($S \xrightarrow{M} S'$). M est non-fiable ssi $\exists M'$ tel que $S \xrightarrow{M'} S'$ et $M \neq M'$.*

Définition 2 (Etat non-fiable) : *Un état S est non-fiable ssi $\exists M, \exists S'$ tels que $S \xrightarrow{M} S'$ et M est non-fiable. (i.e. ssi il existe des mouvements non-fiables possibles à partir de S .)*

Caractérisation de la solvabilité À partir de ces définitions, nous pouvons étendre le théorème 1 et proposer deux définitions de la solvabilité de SOMI – avec ou sans connaissance *a priori* de la trajectoire :

Théorème 2 (P-Solvabilité) : *Soit un GCC $G(V, E)$ représentant le système dans lequel les objets de \mathbb{O} peuvent se déplacer. Étant donnée $P \in \mathbb{P}_{t_i, t_j}$: SOMI peut être résolu ssi $\forall t \in [t_i, t_{j-1}]$, M_t est fiable.*

En effet, si tous les mouvements sont fiables pour une trajectoire donnée, l'observateur ne peut donc pas confondre avec une autre trajectoire ayant la même séquence d'état, et SOMI est donc solvable. D'une manière plus générale, ce dernier théorème s'étend de la façon suivante :

Théorème 3 (\mathbb{P} -Solvabilité) : *Soit un GCC $G(V, E)$ représentant le système dans lequel les objets de \mathbb{O} peuvent se déplacer. $\forall P \in \mathbb{P}_{t_i, t_j}$: SOMI peut être résolu ssi $\forall S \in \mathbb{S}$, S est fiable.*

Dans ce cas, comme toutes trajectoires de \mathbb{P}_{t_i, t_j} peuvent survenir, alors tous les mouvements possibles du système, quel que soit l'état initial, doivent être fiables (d'après le théorème 2). Dans ce cas, si aucun des mouvements possibles est non-fiable, alors, par définition, tous les états sont fiables également.

Une condition suffisante pour rendre SOMI \mathbb{P} -solvable Dans ce paragraphe, nous proposons deux théorèmes permettant de résoudre SOMI en ajoutant des contraintes sur certaines caractéristiques du système. Spécifiquement, nous montrons comment le problème devient aisément solvable si, d'une certaine façon, il est possible de limiter les déplacements des objets. Le problème de solvabilité de SOMI est directement issu de la présence d'éléments non fiables au cours d'une trajectoire. En supprimant l'avènement de ces événements, il est possible de rendre toute trajectoire identifiable. D'une manière pratique, rendre SOMI résoluble signifie limiter certains déplacements d'objets dans l'environnement, ou modifier l'environnement lui-même, *etc.* Fondamentalement, l'unique cause de non-solvabilité est la présence de cycles dans le GCC, comme le montrent les théorèmes 4 et 5 suivants. Nous notons \mathbb{P}^k le sous-ensemble des trajectoires de \mathbb{P} dans lesquelles au maximum k objets se déplacent simultanément : $\emptyset = \mathbb{P}^0 \subset \mathbb{P}^1 \subset \dots \subset \mathbb{P}^k \subset \dots \subset \mathbb{P}^x = \mathbb{P}$.

Théorème 4 : *Soient $k \leq |\mathbb{O}|$ le nombre maximum d'objets se déplaçant simultanément, $\ell > 1$ un entier et un GCC ne contenant pas de cycle de longueur $1 < l < \ell$. $\forall P \in \mathbb{P}^k$: SOMI est P-solvable ssi $\lceil \frac{\ell}{2} \rceil > k$.*

La contrainte d'espace ne nous permet pas de développer la preuve de ce théorème, disponible malgré tout dans [BQB⁺08]. De manière pratique, il existe deux méthodes pour garantir les conditions de ce théorème. La première consiste à choisir une topologie de GCC caractérisée par des cycles de longueur supérieure à $2 \cdot x$. En conséquence, SOMI est \mathbb{P} -solvable pour n'importe quel système acyclique (cf. théorème 5). Une seconde méthode consiste à limiter le nombre d'objets ayant le droit de se déplacer simultanément.

Théorème 5 : *SOMI est \mathbb{P} -solvable dans n'importe quel système défini par un GCC $G(V, E)$ acyclique.*

En considérant qu'un graphe acyclique possède un plus petit cycle de taille infinie, la preuve de ce dernier théorème est immédiate par l'utilisation du théorème 4.

Références

- [ABC⁺03] Javed Aslam, Zack Butler, Florin Constantin, Valentino Crespi, George Cybenko, and Daniela Rus. Tracking a moving object with a binary sensor network. In *SenSys'03*, 2003.
- [AGY04] James Aspnes, David Goldengerg, and Yang Richard Yang. On the computational complexity of sensor network localization. In *Workshop on Algorithmic Aspects of WSNs*, 2004.
- [BIL⁺07] Domenico Bloisi, Luca Iocchi, G. R. Leone, R. Pigliacampo, L. Tombolini, and Lorena Novelli. A distributed vision system for boat traffic monitoring in the venice grand canal. In *VISAPP'07*, 2007.
- [BQB⁺08] Yann Busnel, Leonardo Querzoni, Roberto Baldoni, Marin Bertier, and Anne-Marie Kermarrec. On the deterministic tracking of moving objects with a binary sensor network. In *DCOSS '08*, 2008.
- [LLR⁺03] Juan Liu, Jie Liu, James Reich, Patrick Cheung, and Feng Zhao. Distributed group management for track initiation and maintenance in target localization applications. In *IPSN'03*, 2003.
- [OS05] Songhwai Oh and Shankar Sastry. Tracking on a graph. In *IPSN'05*, 2005.